

PROJEKTOWANIE SIECI KANALIZACYJNYCH

Agnieszka Służalec

Instytut Badań Systemowych
Polska Akademia Nauk
ul. Nowelska 6, 01-447 Warszawa
e-mail: asluzalec@wp.pl

Streszczenie: *W artykule omawia się zasady projektowania systemów kanalizacyjnych w ujęciu tradycyjnym i wykorzystywanie w procesie projektowania technik informacyjnych. Przedstawiono wykorzystywane techniki informacyjne i możliwości wynikające z ich wprowadzenia oraz potrzebę ich stosowania.*

Słowa kluczowe: *Kanalizacja ściekowa, deszczowa i ogólnospławna, projektowanie systemów kanalizacyjnych, wspomaganie komputerowe projektowania.*

Forecasting the raw sewage inflow by means of the MACD algorithm

Abstract: *In the paper the traditional and computer aided methods and procedures of wastewater networks planning are described and discussed. The information techniques supporting the planning of wastewater nets are presented and the necessity of their application is substantiated.*

Keywords: *Wastewater networks, sanitary, rain and mixed wastewater nets, planning the communal wastewater systems, traditional and computer aided planning of the wastewater nets.*

1 WSTĘP

System kanalizacyjny to układ przewodów wraz z uzbrojeniem i obiektami pomocniczymi, którego celem jest transport ścieków z miejsc ich powstawania do oczyszczalni ścieków lub w skrajnych przypadkach bezpośrednio do odbiornika [9, 6]. Przez ścieki rozumie się wody zużyte w gospodarstwach domowych, obiektach komunalnych, w przemyśle i w wyniku innej działalności gospodarczej lub wody opadowe pochodzące z deszczu lub topnienia śniegu.

Wyróżnia się następujące rodzaje ścieków [2,7]:

- ścieki bytowo gospodarcze –fekalne, z umywalni, kuchni, pralni itp., powstające w gospodarstwach domowych, instytucjach użyteczności publicznej, zakładach przemysłowych itp.,

- ścieki przemysłowe – powstające w wyniku procesów produkcyjnych w zakładach przemysłowych lub w wyniku wykonywania różnych czynności w zakładach usługowych,
- ścieki opadowe – wody deszczowe lub wody z topnienia śniegu oraz ścieki powstające przy polewaniu i myciu ulic.

W zależności od rodzaju transportowanych ścieków wyróżniamy: kanalizację ściekową - odprowadzającą ścieki bytowo-gospodarcze i przemysłowe, kanalizację deszczową – odprowadzającą ścieki opadowe, oraz kanalizację ogólnospławną – odprowadzającą wszystkie wymienione wcześniej rodzaje ścieków.

Projektowanie systemów kanalizacyjnych polega na określeniu układu sieci w planie powierzchniowym, układu wysokościowego sieci, tj. zagłębień i rzędnych kanałów w węzłach oraz spadków między węzłami, określeniu zlewni

i odpływów ze zlewni, przepływów w sieci, wymiarów kanałów, uzbrojenia sieci i specjalnych obiektów na sieci [1, 5].

Kolejne kroki postępowania w projektowaniu różnych systemów kanalizacyjnych są podobne, jednak charakteryzuje je odmienny sposób przeprowadzania obliczeń hydraulicznych, prowadzących do ich wymiarowania, a także różne warunki brzegowe.

Z uwagi na to, że proces obliczeniowy jest czynnością długotrwałą i pracochłonną, zwłaszcza w przypadku dużych systemów kanalizacji ogólnospławnej, a także ze względu na nowe wymagania stawiane projektowaniu sieci kanalizacyjnych, regulowane odpowiednimi przepisami, niezbędnym jest wykorzystywanie w procesie projektowania technik informacyjnych. Wspomaganie komputerowe projektowania nie tylko usprawnia sam proces skracając czas jego trwania, ale także umożliwia dokładniejszą analizę pracy projektowanego systemu.

W artykule przedstawiono ogólne zasady projektowania sieci kanalizacyjnych, wykorzystywanie technik informacyjnych w procesie projektowania i możliwości wynikające z ich stosowania wraz z ich charakterystyką oraz wyzwania stawiane projektantom sieci kanalizacyjnych².

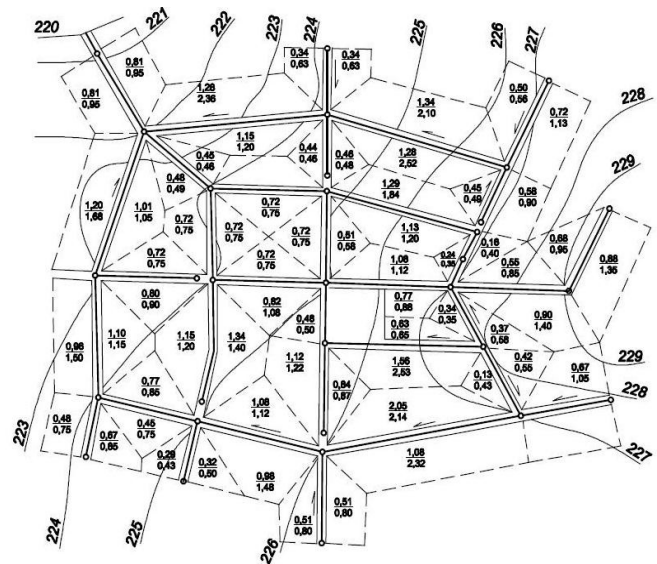
2. OGÓLNE ZASADY PROJEKTOWANIA SYSTEMÓW KANALIZACYJNYCH

Przy projektowaniu systemów kanalizacyjnych stosuje się plany sytuacyjno-wysokościowe terenów kanalizowanych, plany zagospodarowania przestrzennego rozpatrywanego obszaru, projekt wodociągu lub dane określające zużycie wody, dane hydrologiczne i hydrogeologiczne badanego terenu oraz dane hydrograficzne odbiornika [1, 5].

Pierwszą fazę projektowania systemu kanalizacyjnego, bez względu na rodzaj transportowanych ścieków, stanowi trasowanie kanału, tzn. opracowanie szczegółowego planu kanału i wyznaczeniu jego osi na planie ulicy, gdy jest to możliwe równoległe do linii rozgraniczających ulicy. Mając wyznaczony szkielet sieci kanalizacyjnej, przeprowadza się analizę wysokościową kanalizowanego obszaru, aby określić wstępnie kierunki odpływu ścieków, umożliwiające zapewnienie grawitacyjnego odpływu do sieci kanalizacyjnej ścieków z nieruchomości i/lub ścieków deszczowych z terenu, zapewnienie dostatecznego przykrycia kanału ze względu na obciążenie dynamiczne i ze względu na przemarzanie gruntu, uniknięcie kolizji

z innymi sieciami i urządzeniami podziemnymi, a także kierując się względami eksploatacyjnymi i ekonomicznymi budowy sieci.

Dla wyznaczonego układu określa się zlewnie ciągnące do poszczególnych odcinków kanałów między węzłami, zgodnie a przyjętą zasadą, którą jest podział przylegających powierzchni wg dwusiecznych kątów między kanałami lub liniami rozgraniczającymi i wg linii łączących punkty przecięcia dwusiecznych [1, 7] (rys. 1).



Rysunek 1. Schemat podziału na zlewnie cząstkowe.

Druga faza, to obliczenia hydrauliczne przekrojów kanałów, które polegają na wyznaczeniu wymiarów kanału, określeniu napęgnięć ściekami i prędkości ich przepływu. Obliczenia przeprowadza się dla kolejnych odcinków sieci między węzłami na podstawie ustalonego wcześniej przepływu maksymalnego i przyjętego spadku dna kanału. Podstawowymi wzorami do hydraulicznego obliczania kanałów są [1, 3, 5]:

- na określenie prędkości, wzór Chezy'ego:

$$V = C * \sqrt{R_h * i} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1)$$

gdzie:

m (lub n) – współczynnik szorstkości (najczęściej przyjmuje się $n=0,013$),

R_h – promień hydrauliczny, równy stosunkowi czynnego przekroju do obwodu zwilżonego,

² Praca wykonana w ramach realizacji projektu badawczego NCN Nr N N519 6521 40.

i – spadek zwierciadła ścieków, równy spadkowi dna kanału przy przepływie cieczy o swobodnym zwierciadle lub spadek linii ciśnień przy pracy kanału pod ciśnieniem,

C – współczynnik prędkości; w Polsce najczęściej wyznaczany ze wzoru Manning’a określonego wzorem:

$$C = \frac{1}{n} R_h^{\frac{1}{6}} \quad (2)$$

– na określenie natężenia przepływu zgodnie z prawem ciągłości strugi, wzór:

$$Q = V * f \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (3)$$

gdzie:

f – powierzchnia czynnego przekroju strumienia ścieków.

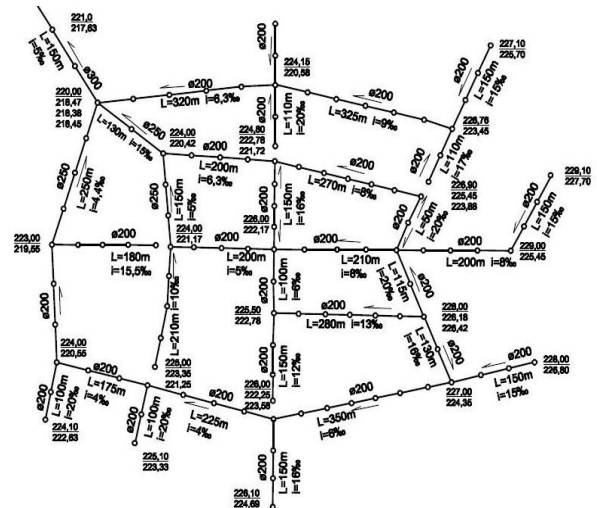
Zgodnie z normą [12, 6], współczynnik prędkości C może być również określany wg formuły Colebrooke’a-White’a. Oprócz przytoczonych powyżej formuł istnieje również szereg innych wzorów, szeroko opisanych w [1, 3, 4].

Prędkości i natężenia przepływów dla różnych napełnień kanałów odczytuje się z tzw. krzywych sprawności przekrojów opracowanych w oparciu o wzór Manning’a lub z zestawień tabelarycznych. Najczęściej jednak w obliczeniach kanałów korzysta się z nomogramów, z których można bezpośrednio odczytać przepływy i prędkości zarówno przy napełnieniach całkowitych, jak i częściowych [1, 4].

Trzecią fazę stanowi opracowanie rysunków. Projekty systemów kanalizacyjnych opracowywane są w różnych stadiach, które rozróżnia poziom opracowania szczegółów, począwszy od projektów koncepcyjnych (wstępnych), stanowiących projekty ogólne całej jednostki osadniczej, przez projekty techniczne dla takiej jednostki podzielone według zlewni poszczególnych kolektorów, po projekty budowlano-wykonawcze poszczególnych kanałów [1, 5, 6]. W przypadku projektów technicznych kanałów w określonych ulicach przedstawia się pełne uzbrojenie sieci, zarówno na planie sytuacyjnym, jak również w profilu podłużnym. Dołącza się także rysunki szczegółowe występującego na kanale uzbrojenia. Przykładowy plan sytuacyjny projektowanej kanalizacji przedstawia rys. 2.

Jakkolwiek zasady obowiązujące w pierwszej i trzeciej fazie projektowania są wspólne dla systemów kanalizacji ściekowej, deszczowej i ogólnospławnej, to czynnikiem je

różniącym jest faza druga. Podstawą do wymiarowania systemów kanalizacyjnych jest określenie przepływów maksymalnych, których sposób obliczania jest uzależniony od rodzaju systemu.



Rysunek 2. Plan sytuacyjny kanalizacji z wraz z oznaczeniem przekrojów, długości, spadków i rzędnych kanałów.

2.1 Zasady wymiarowania i warunki brzegowe przy projektowaniu kanalizacji ściekowej

Podstawą do wymiarowania sieci kanalizacji ściekowej są ustalone w rozwiązaniu wysokościowym sieci spadki kanałów oraz wyliczone maksymalne przepływy, uwzględniające odpływ ścieków bytowo-gospodarczych, przemysłowych oraz wody infiltracyjne.

Woda zapotrzebowana na cele higieniczne i gospodarcze w gospodarstwach domowych, w zakładach pracy, zakładach usługowych i użyteczności publicznej, po użyciu dostaje się prawie całkowicie do sieci kanalizacyjnej jako ścieki bytowo-gospodarcze. Tylko część wody zużytej na cele ogólno-komunalne (polewanie i zmywanie ulic, polewanie zieleni) oraz do celów przeciwpożarowych sływa do kanałów deszczowych i ogólnospławnych. Dlatego przy ustalaniu ilości ścieków bytowo-gospodarczych można wychodzić z ustaleń przyjętych przy określaniu zapotrzebowania na wodę, zarówno co do wskaźników ilościowych, jak i współczynników nierównomierności [1, 7, 8].

Biorąc za podstawę jednostkowe ilości ścieków w l/s*M określa się jednostkowy opływ ścieków w sieci na podstawie wzoru [1, 7]:

$$q = q_i * G \left[\frac{l}{s} ha \right] \quad (4)$$

gdzie:

- q – ilość odpływających ścieków, [l/s ha],
- q_i – odpływ jednostkowy ścieków, [l/M],
- G – gęstość zaludnienia, [M/ha], przyjmowana np. z planów zagospodarowania przestrzennego.

Woda zapotrzebowana do celów technologiczno–produkcyjnych w zakładach przemysłowych sphywa całkowicie lub częściowo (w zależności od procesów technologicznych) do sieci kanalizacyjnej. Rozpatrując oddzielnie odpływy z poszczególnych zakładów przemysłowych, należy ustalać ilości ścieków przemysłowych na podstawie analizy procesów technologicznych i celów, do których woda jest pobierana, zwłaszcza w przypadku zakładów, w których woda jest surowcem, oraz zakładów z zamkniętymi obiegami wody chłodniczej. Do określonych w ten sposób ilości ścieków poprodukcyjnych trzeba doliczyć ilości ścieków bytowo–gospodarczych i w ten sposób ustalić ogólną ilość ścieków dla danego zakładu. W razie braku szczegółowych danych, ilości ścieków przemysłowych można oszacować, biorąc za podstawę powierzchnię terenu zajmowaną przez zakład. Ilości odpływu w zależności od wodochłonności zakładu wynoszą 0,5÷5,0 [l/s ha] [1, 7, 8, 9].

Do kanalizacji ściekowej trafiają także wody gruntowe, które infiltrują do kanałów przez ścianki i nieuszczelne złącza oraz wody przypadkowe, m.in. wody opadowe przedostające się do kanałów przez skrzynki włazowe i przewietrzniki. Ilość wód przypadkowych jest trudna do oszacowania. Udział wód infiltracyjnych w odniesieniu do ilości odprowadzanych ścieków może wynieść nawet do 100% [1, 7, 8].

Mając określone, wg przytoczonych powyżej zasad, wskaźniki ilości ścieków (q [l/s ha]) i wyliczone wielkości zlewni (F [ha]) ciężących do danego odcinka kanału, oblicza się odpływ do kanału ($Q_{odc.}$) przez sumowanie odpływów z poszczególnych cząstkowych zlewni, wg zależności [1, 7]:

$$Q_{odc.} = \sum q * F \left[\frac{l}{s} \right] \quad (5)$$

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskuje się maksymalne przepływy w poszczególnych odcinkach sieci, które wraz z określonymi wstępnie spadkami służą do wymiarowania odcinków sieci między węzłami, tj.

określania wymiarów kanału, napełnień ściekami czy prędkości przepływu. Oblicza się również ostatecznie rzędne i spadki kanałów.

Przy wymiarowaniu przewodów kanalizacji ściekowej należy mieć na uwadze obostrzenia, stanowiące warunki brzegowe. Należą do nich m.in.:

- minimalna średnica przewodu $\emptyset = 0,20m$,
- minimalny spadek kanału, który powinien zabezpieczyć dopuszczalne minimalne prędkości przepływu (wg [1] 0,6-0,8m/s, wg [12] 0,7 m/s) i nie powinien być mniejszy od:

$$i = \frac{1}{D} [‰] \quad (6)$$

gdzie:

- D – średnica przewodu [m],
- maksymalny spadek kanału, uzależniony od maksymalnej dopuszczalnej prędkości, która wg [1] wynosi odpowiednio: dla rur betonowych i ceramicznych – 3,0 [m/s], dla rur żelbetowych, produkowanych metodą odśrodkową i żeliwnych – 5,0 [m/s],
- minimalne przykrycie przewodu, poniżej strefy przemierzania,
- maksymalne napełnienie, w zależności od przekroju (dla przekrojów kołowych wg [1] $\emptyset = 0,20\div 0,30 m - 0,6 D$, $\emptyset = 0,40\div 0,50 m - 0,7 D$, $\emptyset = 0,60\div 0,90 m - 0,75 D$, $\emptyset > 1,00 - 0,8 D$).

Dopuszczalne maksymalne napełnienie związane jest z zaleceniem, aby nawet przy maksymalnych przepływach przekroje kanałowe nie były całkowicie wypełnione. Wymaganie to postawione jest ze względu na potrzebę należytego przewietrzania kanałów w celu niedopuszczenia do zagniwania ścieków. Poza tym niewypełnienie całego przekroju potrzebne jest jako rezerwa w przypadku zwiększenia ilości ścieków, np. wskutek zwiększenia gęstości zaludnienia.

2.2 Zasady wymiarowania i warunki brzegowe przy projektowaniu kanalizacji deszczowej

Podstawą do wymiarowania sieci kanalizacji deszczowej są, podobnie jak w przypadku kanalizacji ściekowej, ustalone w rozwiązaniu wysokościowym sieci spadków kanałów oraz wyliczone maksymalne przepływy obliczeniowe. Do określania przepływów obliczeniowych w praktyce inżynierskiej najczęściej wykorzystywane są

proste modele przepływu ścieków, oparte na założeniu, że natężenie deszczu nie zmienia się w czasie jego trwania i na całym obszarze jego zasięgu. Należy mieć świadomość, że tak prowadzone obliczenia kanalizacji deszczowej i również ogólnospławnej mają charakter przybliżony.

W celu określenia spływów deszczowych konieczne jest wyznaczenie deszczu miarodajnego i jego natężenia, współczynnika spływu oraz maksymalnego obliczeniowego przepływu, potrzebnego do wymiarowania kanału w danym punkcie. Spływy deszczowe mogą być obliczane dwiema metodami: metodą stałych natężeń deszczu oraz metodą granicznych natężeń deszczu.

Metoda stałych natężeń deszczu jest oparta na związku między natężeniem deszczu i wielkością zlewni $q = f(F)$, w której przepływ maksymalny jest obliczany z zależności [1, 9]:

$$Q = \varphi * \psi * q * F \left[\frac{l}{s} \right] \quad (7)$$

gdzie:

q – natężenie deszczu miarodajnego [l/s ha], obliczane ze wzoru Błaszczyka [1,10]; przyjmując najkrótszy czas trwania deszczu równy 10 min, mamy:

$$q = \frac{470 \sqrt[3]{C}}{t^{0,67} \left[\frac{l}{s} ha \right]} \quad (8)$$

gdzie:

C – częstotliwość jednorazowego przekroczenia danego natężenia,

t – czas trwania deszczu, $t = 10$ min, oraz:

F – powierzchnia zlewni [ha],

ψ – współczynnik spływu powierzchniowego, zależny od rodzaju pokrycia zlewni,

φ – współczynnik opóźnienia odpływu, uwzględniający retencję terenową i kanałową i określany z zależności [2, 15]:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt[3]{F} \left[\frac{l}{s} ha \right]} \quad (9)$$

gdzie n – współczynnik zależny od kształtu zlewni i spadku terenu (przyjmowany w zakresie wartości 4÷8).

Przebieg liczenia przepływów wg tej metody jest znacznie prostszy, niż w metodzie granicznych natężeń deszczu. Rezultat jest jednoznacznie określony i zależy tylko od dwóch parametrów: wielkości zlewni i współczynnika spływu. Metoda ta jest dopuszczalna do stosowania w przypadku projektów ogólnych lub wstępnych [2, 17].

Metoda granicznych natężeń deszczu, jest oparta na związku między natężeniem deszczu i czasem jego trwania $q = f(t)$, a przepływ maksymalny jest obliczany z zależności [1, 13]:

$$Q = \psi * q * F \left[\frac{l}{s} \right] \quad (10)$$

gdzie:

q – natężenie deszczu miarodajnego [l/s ha], obliczane ze wzoru Błaszczyka (8), przy czym t – czas deszczu miarodajnego,

F – powierzchnia zlewni [ha],

ψ – współczynnik spływu powierzchniowego, zależny od rodzaju pokrycia zlewni.

Czas deszczu miarodajnego (t_{dm}), to czas, w którym nastąpi całkowite napełnienie kanału. Jest on obliczany z zależności [1,13, 14]:

$$t_{dm} = t_p * t_k * t_r \text{ [min]} \quad (11)$$

gdzie:

t_p – czas przepływu wody przez kanał [min], $t_p = L/(v*60)$ [min] (L – długość kanału [m], V – prędkość przepływu na rozpatrywanym odcinku kanału [m/s]),

t_k – czas koncentracji kanałowej [min],

t_r – czas retencji kanałowej [min], $t_r = 0,2 * t_p$ [min].

W Polsce stosuje się również inne wzory, wg których liczy się przepływy w sieciach kanalizacyjnych, omówione szczegółowo w [1].

Metoda granicznych natężeń deszczu jest metodą kolejnych przybliżeń, dlatego jest żmudna wskutek wielokrotnego powtarzania obliczeń. Posługując się metodą granicznych natężeń, należy dla każdego punktu sieci ustalić miarodajny deszcz i jego parametry: czas trwania i natężenie. Ponieważ czas trwania deszczu przyjmuje się jako równy czasowi przepływu ścieków od początku kanału do punktu rozpatrywanego, zwiększonemu o czas retencji kanałowej i koncentracji kanałowej, konieczne jest dla każdego punktu sieci obliczenie tych wielkości. Sieci nie liczy się w każdym

punkcie, a tylko w jej węzłach. Wielkości obliczone w węzłach są miarodajne dla całego odcinka powyżej tego węzła do węzła następnego.

Przebieg obliczeń w tej metodzie jest następujący. Rozpoczyna się od górnego odcinka. Zakłada się średnią prędkość w kanale na tym odcinku. Mając długość odcinka z planu sytuacyjnego, oblicza się czas przepływu dla założonej prędkości oraz czas deszczu miarodajnego wg wzoru (11), a następnie oblicza się natężenie deszczu miarodajnego wg wzoru (8) oraz przepływ maksymalny na danym odcinku wg wzoru (10). Mając przepływ obliczeniowy i założony spadek kanału dobiera się przekrój i wymiar kanału oraz oblicza się prędkość rzeczywistą w kanale. Z porównania prędkości założonej i rzeczywistej wnioskuje się, czy obliczenie zostało wykonane z dostateczną dokładnością, lub czy obliczenie należy powtórzyć. Prędkości nie powinny się różnić więcej niż 0,1 m/s. Opisany przebieg obliczeń stosuje się do wszystkich innych węzłów na danym przewodzie i do innych przewodów w całej sieci. W obliczeniach metodą granicznych natężeń deszczu zakłada się jako najkrótszy czas trwania deszczu miarodajnego równy 10 min [1, 13, 14].

Ze względu na fakt, że metody wyznaczania spływów deszczowych uzależniają natężenie deszczu miarodajnego od wielkości zlewni, istotne jest dokładne wyznaczenie wielkości zlewni. Najstuszniej należałoby przyjmować podział powierzchni wg rzeczywistych linii rozgraniczających, jakimi są linie wododziałów. Praktycznie jest to podział trudny do przeprowadzenia, stąd też poprzestaje się na umownym sposobie podziału zlewni wg dwusiecznych kątów między osiami kanałów i linii łączących punkty przecięcia dwusiecznych.

Każda zlewnia musi być scharakteryzowana, poza swoją wielkością, współczynnikiem spływu, gdyż do obliczeń wprowadzana jest zlewnia zredukowana. Pod tym pojęciem rozumie się iloczyn wielkości powierzchni zlewni i współczynnika spływu [2, 17].

Obliczone maksymalne przepływy wraz z określonymi wstępnie spadkami służą do wymiarowania odcinków sieci między węzłami, tj. określania wymiarów kanału, napełnień ściekami i prędkości przepływu. Oblicza się również ostatecznie rzędne i spadki kanałów, podobnie jak w przypadku kanalizacji ściekowej.

Przy wymiarowaniu przewodów kanalizacji deszczowej należy mieć na uwadze obostrzenia, stanowiące warunki brzegowe. Należą do nich m.in.:

- minimalna średnica przewodu $\varnothing = 0,25$ m,
- minimalny spadek kanału, który powinien zapewnić dopuszczalne minimalne prędkości przepływu (wg [1] 0,6 - 0,8 m/s, wg [12] 0,7 m/s),

- maksymalny spadek kanału, zależny od maksymalnej dopuszczalnej prędkości, która wg [1] wynosi 7,0 [m/s],
- minimalne przykrycie przewodu, poniżej strefy przemarzania.

Kanały deszczowe projektuje się na całkowite napełnienie.

2.3 Zasady wymiarowania i warunki brzegowe przy projektowaniu kanalizacji ogólnospławnej

Sieć ogólnospławna spławia tymi samymi kanałami w okresach bezdeszczowych ścieki bytowo-gospodarcze i przemysłowe, a w trakcie opadów i topnienia śniegu również ścieki opadowe. Dlatego warunki projektowania przedstawione wcześniej dla kanalizacji ściekowej i deszczowej, jeśli nie wykluczają się wzajemnie, odnoszą się także do kanałów ogólnospławnych, a przebieg projektowania jest podobny.

2.4 Uwagi dotyczące projektowania systemów kanalizacyjnych

Przedstawione zasady wymiarowania systemów kanalizacyjnych wykorzystują najprostsze modele przepływu ścieków w kanałach otwartych i zamkniętych. Dla uproszczenia obliczeń, w tradycyjnych obliczeniach hydraulicznych, stosuje się uproszczony jednowymiarowy model pola prędkości ścieków w kanałach. Mówiąc o prędkości przepływu ścieków w kanałach, rozumie się wartość średnią prędkości równą średniej z rzeczywistego rozkładu prędkości wzdłuż strumienia i obliczaną dla jego przekroju poprzecznego. Zakłada się, że natężenie przepływu, spadek kanału i jego chropowatość na odcinkach obliczeniowych nie zmieniają się w czasie, w związku z czym występuje przepływ jednostajny ustalony [2, 14].

Nawet w przypadku modeli ruchu nieustalonego bardzo często zakłada się, że zmienność chwilowa przepływów jest na tyle mała, że przepływy te można traktować jako quasi ustalone (o słabej zmienności). Przy tym założeniu w obliczeniach można stosować modele ruchu ustalonego, czego dowodem są powszechnie spotykane obliczenia sieci kanalizacyjnych dla uprzednio obliczonych przepływów miarodajnych [8, 11].

O ile założenie niezmienności spadku dna obliczeniowego odcinka kanału oraz niezmienności przekroju i chropowatości jest bliskie rzeczywistości, o tyle przyjęcie założenia o stałości czasowej i przestrzennej przepływu odbiega od rzeczywistości. Jest to szczególnie widoczne przy projektowaniu kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej, gdzie o chwilowych stanach ścieków

w poszczególnych punktach sieci kanalizacyjnej decyduje dynamika opadów atmosferycznych i wywołanego przez nie spływu powierzchniowego oraz transformacja fali odpływu w przewodach kanalizacyjnych. Na początku opadu kanał jest pusty i wypełnia się w miarę upływu czasu. Po ustaniu deszczu i przejściu fali spływu następuje opróżnianie kanału.

Szczegółowa analiza przebiegu tego zjawiska jest możliwa przy zastosowaniu matematycznego modelu przepływu nieustalonego, opisanego różniczkowymi równaniami Saint-Venanta, możliwymi do rozwiązania tylko metodami numerycznymi. Dlatego też w codziennej praktyce inżynierskiej największe zastosowanie mają najprostsze modele przepływu ścieków w korytach zamkniętych i otwartych, gdyż proste modele łatwo można obliczać z zastosowaniem prostych metod obliczeniowych [8, 11]. Należy nadmienić, że uproszczone metody obliczeniowe w przypadku dużych systemów, zwłaszcza kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej, nie wpływają znacząco na przyspieszenie prac projektowych. Ułatwienie i przyspieszenie procesu projektowania może być osiągnięte jedynie przez wprowadzenie bardziej zaawansowanych technik komputerowych. Wykorzystanie takich programów pozwoli zarówno na podniesienie poziomu prowadzenia prac projektowych, jak i na skrócenie czasu niezbędnego do projektowania i sporządzania niezbędnej dokumentacji.

3 ZASTOSOWANIE TECHNIK INFORMACYJNYCH W PROJEKTOWANIU SYSTEMÓW KANALIZACYJNYCH

Ostatnie lata przyniosły zdecydowany postęp w zakresie praktycznego stosowania wyspecjalizowanego oprogramowania komputerowego w inżynierii środowiska. Świadczą o tym coraz szerzej dostępne, także na rynku polskim, programy służące wspomaganie projektowania sieci kanalizacyjnych, zwłaszcza sieci konwencjonalnych. Programy służące projektowaniu sieci kanalizacyjnych są jednym z elementów bardziej rozbudowanych pakietów oprogramowania, dedykowanych projektowaniu także innych elementów infrastruktury [8].

Obecnie projektowanie systemów kanalizacyjnych może być wspomagane przez całą grupę programów komputerowych, takich jak programy rysunkowe CAD, kalkulatory hydrauliczne, oprogramowanie GIS itp.

Opracowane są także kompletne rozwiązania programowe wspomagające projektowanie kanalizacji od samego początku. Przykładem takiego rozwiązania są programy wykorzystujące numeryczny model terenu jako bazy do

projektowania kanalizacji. Dzięki takiemu rozwiązaniu projektowanie nie jest prowadzone na dwuwymiarowej płaszczyźnie mapy, ale w trójwymiarowej przestrzeni [6, 7, 8]. Dane wejściowe do budowy numerycznego modelu terenu pozyskiwane są głównie z pomiarów geodezyjnych i map numerycznych. Model taki generowany jest w postaci przestrzennej siatki powierzchni terenu. Jest on bardzo przydatny jako baza zarówno dla trasowania sieci odwodnienia, jak też na etapie określania ich obciążenia spływami wód opadowych. Zastosowanie numerycznego modelu terenu daje możliwość istotnego uproszczenia operacji obliczania wielkości spływów z poszczególnych elementarnych pól spływu, a także może być użyteczne przy wyznaczaniu granic elementarnych pól spływu powierzchniowego [7, 8, 9].

Innym przykładem usprawnienia procesu projektowania i eksploatacji sieci kanalizacyjnych są programy symulujące ich pracę, dzięki czemu możliwa jest optymalizacja procesu projektowania oraz uniknięcie błędów, które w przyszłości wymagałyby dużych nakładów inwestycyjnych związanych z przebudową wadliwie zaprojektowanych sieci. Solving of Truss Structure with Interval Parameters

3.1 Programy rysunkowe i kalkulatory hydrauliczne

Do programów wspomagających projektowanie sieci kanalizacyjnych zaliczamy programy rysunkowe typu AutoCAD i ArCADia oraz kalkulatory hydrauliczne, np. KANKAN i Kanalia.

Programy graficzne typu AutoCAD, to dobre narzędzie przede wszystkim do trasowania przewodów oraz wyznaczania zlewni i określania ich powierzchni. Ze środowiskiem AutoCAD-a współpracuje również wiele programów symulacyjnych.

Nieco odmiennym oprogramowaniem, umożliwiającym również prowadzenie obliczeń hydraulicznych, jest ArCADia-Kanalizacja zewnętrzna, przeznaczona do projektowania kanalizacji deszczowych i ściekowych. Program stworzony na platformie CAD umożliwia automatyczną generację profilu na podstawie narysowanej uprzednio trasy sieci. Zautomatyzowanie funkcji rysowania trasy sieci pozwala na wstawianie domyślnych obiektów na każdym załamaniu. Program wyposażono także w specyficzne okna dialogowe obiektów, które pozwalają na: obliczenie zlewni i przepływów, dobór średnic i spadku kanału wylotowego, dobór szczegółowych parametrów wysokościowych, zestawienie elementów i rysunki szczegółowe. Wprowadzenie uproszczonego interfejsu doboru poszczególnych elementów obiektu pozwala użytkownikowi na bardzo szybki i łatwy dobór

szczegółów. Projektant po wykonaniu wszystkich obliczeń może wygenerować w formacie RTF raporty obliczeniowe, które można później umieścić w opisach technicznych, a także zestawienia elementów dla pojedynczego obiektu lub całego projektu. Program ma przewagę nad aplikacjami KANKAN oraz Kanalia, omówionymi poniżej, gdyż jest kompatybilny nie tylko z systemem Windows XP, ale również Windows Vista 32/64-bit lub Windows 7 32/64-bit.

Wspomniane programy KANKAN czy Kanalia, to kalkulatory hydrauliczne wspomagające wymiarowanie hydrauliczne systemów kanalizacyjnych. Ich zadaniem jest:

- analiza hydrauliczna sieci o znanych wymiarach przekrojów (średnicach i spadkach),
- projektowanie spadków odcinków sieci o zadanych wymiarach przekrojów (średnicach przewodów),
- projektowanie wymiarów przekrojów (średnic) odcinków sieci,
- projektowanie rozbudowy lub przebudowy sieci.

Programy te służą do obliczania sieci kanalizacji ściekowej, deszczowej i ogólnospławnej. Sieć może być złożona z dowolnej liczby odcinków, przy czym obowiązuje zasada jednego wylotu dla każdego węzła. Do dyspozycji projektanta w programach Kanalia i KANKAN jest: 11 typów przekrojów, 4 wzory do obliczania przepustowości, 6 wzorów do obliczania natężenia deszczu, 4 sposoby łączenia kanałów. W przypadku kanalizacji deszczowej przepływy określone są metodą granicznych natężeń deszczu. Wynikiem działania programu są m.in. wydruki zawierające informację o sieci i parametrach jej pracy. Programy działają w środowisku MS Windows 95/98/XP [16].

Przedstawione aplikacje wspomagające projektowanie wykorzystują najprostsze modele przepływu ścieków w korytach zamkniętych lub otwartych, uwzględniając uproszczony jednowymiarowy model pola prędkości ścieków w kanałach. W codziennej praktyce inżynierskiej stosowane są dość często, przede wszystkim dlatego, że oszczędzają czas, który byłby potrzebny na każdorazowe odczytywanie istotnych parametrów z nomogramów.

3.2 Komputerowe modele hydrodynamiczne

Komputerowe modele hydrodynamiczne, to programy umożliwiające uwzględnianie rzeczywistych warunków panujących w kanałach. Dotychczas stosowane metody wymiarowania kanałów, jak już wspomniano wcześniej, opierają się na parametrach hydraulicznych określonych

dla warunków przepływu ustalonego i często nie uwzględniają wszystkich istotnych czynników. Szczegółowa analiza przebiegu zjawisk panujących w kanałach jest możliwa przy zastosowaniu matematycznego modelu przepływu nieustalonego, opisanego różniczkowymi równaniami Saint-Venanta. Równania te pozwalają na wyznaczenie zmian przepływu oraz poziomu zwierciadła ścieków w czasie i na długości kanału. Możliwe jest ponadto odwzorowanie spiętrzeń oraz przepływów wstecznych (w kierunku przeciwnym do spadku dna kanału), co daje pełen obraz zjawisk towarzyszących przejściu fali wód deszczowych [14].

Próby opracowania specjalistycznych programów pozwalających na rozwiązanie wspomnianych wcześniej równań były podejmowane od lat, zwłaszcza w ośrodkach akademickich. Pierwsze programy służące do modelowania przepływów w kanalizacji pojawiły się w już w latach siedemdziesiątych XX wieku, lecz zastosowanie ich na szerszą skalę rozpoczęło się dopiero w latach dziewięćdziesiątych. Przyczynił się do tego zarówno gwałtowny rozwój komputerów osobistych i technik monitoringu [5], jak również stosowanie Geograficznych Systemów Informacji (GIS), usprawniających zarządzanie dużą ilością danych dotyczących modelu. Obecnie komputerowe modelowanie zjawisk związanych przede wszystkim z odprowadzaniem ścieków deszczowych z obszarów miejskich staje się standardem w projektowaniu, planowaniu i analizie działania systemów kanalizacyjnych.

Konieczność stosowania profesjonalnych narzędzi do analizy rzeczywistych warunków panujących w kanałach jest uwarunkowana zapisami prawnymi określonymi w [13]. Omówione w poprzednim punkcie racjonalne metody określania spływów deszczowych, zgodnie z [13], są dopuszczalne dla małych zlewni o powierzchni do 200 ha lub dla czasów koncentracji do 15 min, przy założeniu stałej intensywności deszczu. W przypadku symulacji pracy większych układów, przy analizie podłączania nowych kolektorów, przy obliczeniach sprawdzających istniejących systemów oraz przy obliczeniach wariantów renowacji systemów kanalizacji, zgodnie z [13], są wymagane komputerowe modele symulacyjne przepływu, a także zmienne w czasie charakterystyki deszczu nawalnego.

Do ciągłego doskonalenia zasad wymiarowania systemów kanalizacyjnych zmuszają projektantów nasilające się w ostatnim czasie ekstremalne zjawiska przyrodnicze, takie jak gwałtowne bądź długotrwałe opady i związane z nimi powodzie i wylewy z kanalizacji. Dyskusję na temat potrzeby udoskonalenia metod obliczeniowych podjęto w pracach [3] i [4].

4 CHARAKTERYSTYKA I PRZEGLĄD PROGRAMÓW SYMULACYJNYCH

Programy do modelowania sieci kanalizacyjnych składają się z bazy danych oraz modułu obliczeniowego i graficznego. W bazie danych są gromadzone dane dotyczące struktury i parametrów sieci (zlewni, kanałów, studzienek, przelewów burzowych, zbiorników retencyjnych itp.), informacje o opadach deszczu oraz rezultaty obliczeń. Moduł graficzny wspomaga wprowadzanie danych bezpośrednio z map zasadniczych. Służy też do ich wizualizacji w formie planów sieci i profili podłużnych kanałów, a także pozwala na prezentację wyników symulacji w postaci wykresów lub animacji zmian poziomu zwierciadła ścieków w kanale w czasie odpływu fali wód deszczowych [15].

Obliczenia w programach symulacyjnych przebiegają w trzech etapach. W pierwszym wyznaczany jest tzw. opad efektywny, czyli ta część opadu całkowitego, która bierze udział w formowaniu odpływu. Opad efektywny jest mniejszy od opadu całkowitego o straty hydrologiczne powodowane zwilżaniem powierzchni zlewni, parowaniem, retencją powierzchniową oraz infiltracją. W zależności od programu stosowane są różne zależności opisujące poszczególne procesy, inny jest też sposób określania parametrów determinujących straty hydrologiczne. Mogą one być definiowane globalnie dla całego systemu lub indywidualnie dla każdej zlewni cząstkowej. W drugiej fazie obliczeń opad efektywny przekształcany jest w odpływ ze zlewni [15].

Obliczenia odpływu mogą być prowadzone dwoma metodami, określanymi w literaturze niemieckiej jako metoda hydrauliczna i hydrologiczna. W metodzie pierwszej zlewnią jest kanał prostokątny o dużej szerokości, a odpływ obliczany jest na podstawie uproszczonych równań de Saint-Venanta (model fali kinematycznej). W metodzie hydrologicznej wykorzystuje się hydrogramy jednostkowe. Dane o opadach wprowadzane są jako impulsy o określonych czasie trwania i wysokości lub natężeniu. Istota metody hydrologicznej polega na założeniu, że każdy z impulsów opadu wywołuje pojedynczy hydrogram odpływu o określonym kształcie opisanym funkcją bazową. Łączny odpływ ze zlewni obliczany jest w wyniku sumowania hydrogramów wywołanych poszczególnymi impulsami opadu. Najczęściej stosowaną metodą hydrogramu jednostkowego jest model zbiornika liniowego, w którym jako funkcja bazowa jest wykorzystywana krzywa wykładnicza [15].

Odpływ wód deszczowych wyznaczony w drugim etapie obliczeń wykorzystuje się do trzeciego etapu – obliczenia

przepływu w kanałach. Poszczególne programy różnią się przede wszystkim algorytmem numerycznym używanym do rozwiązania równań de Saint-Venanta. W wyniku obliczeń uzyskuje się informacje o zmianie wartości natężenia przepływu i poziomu zwierciadła ścieków na długości kanału w czasie. Oprócz opisanego podstawowego zakresu obliczeń, niektóre z aplikacji umożliwiają obliczanie zmian jakości ścieków oraz procesów sedymentacji w czasie transportu siecią kanalizacyjną.

W programach symulacyjnych dostępnych na rynku dominują dwa rozwiązania struktury. W jednym wszystkie moduły programu są zintegrowane w jednej aplikacji. W drugim wykorzystywane są zewnętrzne środowiska graficzne (najczęściej na bazie programu AutoCad) i bazy danych (najczęściej Access z pakietu Microsoft Office). Budowa programu determinuje jego przeznaczenie. Programy ze zintegrowanymi modułami służą przede wszystkim do przeprowadzania obliczeń symulacyjnych (np. Mouse, SWMM). Aplikacje korzystające z zewnętrznych modułów (np. CARD/1, Hykas, Hystem-Extran) mają rozbudowane bazy danych, zawierające informacje m.in. o wieku elementów, ich stanie technicznym czy przeprowadzanych naprawach. Część obliczeniowa tego typu programów pozwala zazwyczaj tylko na obliczanie przepływu w kanałach i jej podstawowym celem jest ułatwienie weryfikacji założeń projektowych.

Często spotyka się też opcje wstępnego, automatycznego wymiarowania średnic kanałów. Programy tej grupy znajdują zastosowanie w celach inwentaryzacyjnych i jako systemy komputerowego wspomaganie projektowania (CAD).

Między obecnymi na rynku programami symulacyjnymi istnieje wiele różnic, m.in. w wykorzystywanych przez te programy metodach obliczeniowych, kompatybilności z innym oprogramowaniem itp. Wśród licznych programów wykorzystujących modele hydrodynamiczne wyróżniamy następujące:

WaterGEMS – to pierwszy i jedyny program do modelowania sieci kanalizacyjnych, który ma możliwość korzystania z dowolnej platformy projektowej (MicroStation, ArcGIS, AutoCAD) a także posiada całkowicie przebudowany, niezależny interfejs, który ułatwia posługiwanie się programem oraz zwiększa szybkość i elastyczność jego działania.

MIKE-URBAN – to system łączący modelowanie matematyczne z technologią ESRI w zakresie systemów GIS, w wyniku czego powstał kompletny system do modelowania i zarządzania danymi geograficznymi. Program umożliwia realizację obliczeń spływu

powierzchniowego (użytkownik może korzystać z czterech metod obliczeniowych), przepływu w kanałach i procesu sedimentacji. Program Mouse zawarty w systemie posiada wbudowany moduł automatycznej kalibracji modelu hydraulicznego sieci. Parametry modelu są obliczane na podstawie porównania pomiarów przepływu z rezultatami obliczeń z wykorzystaniem procedury optymalizacyjnej. System jest w pełni zintegrowany z modelami hydraulicznymi sieci kanalizacyjnej i wodociągowej SWMM5 i EPANET, opracowanymi przez agencję U.S. EPA [15].

Kolejnym oprogramowaniem jest Hykas niemieckiej firma REHM. Aplikacja wykorzystuje bazę danych Access z pakietu Microsoft Office oraz program AutoCad jako środowisko graficzne. Hykas służy do obliczeń spływu powierzchniowego i przepływu w kanałach. Posiada także moduł wstępnego wymiarowania średnic kanałów, który można wykorzystać w projektowaniu systemów kanalizacyjnych [15].

Niemiecką propozycją jest również program Hystem-Extran. Ten program opracowany przez zespół prof. F. Siekera z ITWH (Institut für Technisch-Wissenschaftliche Hydrologie GmbH) w Hanowerze służy do obliczeń odpływu ze zlewni i przepływu w kanałach. Aplikacja bazuje na autorskiej metodzie wyznaczania spływu powierzchniowego. Algorytm obliczania przepływu w kanałach został zaadaptowany z pakietu SWMM. Program może funkcjonować samodzielnie (wymaga wówczas bazy danych Access), bez możliwości wizualizacji planów sieci i profili podłużnych. Może także współpracować z systemem informacji przestrzennej GIPS (także autorstwa ITWH) oraz systemem IKIS firmy IBAK [15].

Opracowane są także bardziej uniwersalne rozwiązania programowe. Przykładami takich rozwiązań są programy wykorzystujące numeryczny model terenu jako bazy do projektowania kanalizacji, m.in. InRoadsStorm&Sanitary, omówiony w [6] i [7], oraz SewerPac niemieckiej firmy Rehm, którego charakterystyka została przedstawiona w [8]. Dzięki takim rozwiązaniom projektowanie nie jest prowadzone na dwuwymiarowej płaszczyźnie mapy, ale w trójwymiarowej przestrzeni.

Alternatywę do komercyjnych programów komputerowych wykorzystujących modele hydrodynamiczne stanowi SWMM (Storm Water Management Model), opracowany w 1971 roku przez U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency) i przez wiele lat rozwijany i testowany w zastosowaniach praktycznych. Początkowo program działał tylko w trybie tekstowym MS DOS. Obecnie od 2004 roku funkcjonuje piąta wersja programu SWMM, w pełni kompatybilna z systemem Windows, udostępniona

bezpłatnie na stronie U.S. EPA wraz z kodami źródłowymi i instrukcją obsługi. Z tego powodu program ten był i jest chętnie wykorzystywany do tworzenia rozwiązań komercyjnych. Program ma typową budowę i składa się z trzech podstawowych, zintegrowanych ze sobą modułów. Obliczenia, podobnie jak w pozostałych programach symulacyjnych, są prowadzone w trzech, omówionych wcześniej etapach. Obliczanie przepływu mogą być przeprowadzane w kolektorze ze swobodnym zwierciadłem oraz pod ciśnieniem, możliwa jest także symulacja zjawiska wypływu ścieków na powierzchnię terenu. Oprócz odpływu wód deszczowych, można też obliczać odpływy wód roztopowych z topnienia pokrywy śnieżnej oraz zmiany jakości ścieków w czasie przepływu przez kanały [17].

5 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Z uwagi na to, że proces obliczeniowy projektowania kanalizacji jest niejednokrotnie czynnością długotrwałą i pracochłonną, zwłaszcza w przypadku dużych systemów kanalizacji deszczowej lub ogólnospławnej, a także ze względu na nowe wymagania stawiane projektowaniu sieci kanalizacyjnych regulowane odpowiednimi przepisami, niezbędnym jest wykorzystywanie w procesie projektowania technik informacyjnych. Wspomaganie komputerowe projektowania nie tylko usprawnia sam proces, skracając czas jego trwania, ale także umożliwia dokładniejszą analizę pracy projektowanego systemu.

Obecnie obserwuje się szczególnie wzrost zainteresowania komputerowym modelowaniem zjawisk związanych z odprowadzaniem ścieków. Związane jest to z tym, że na etapie projektowania zastosowanie modeli komputerowych daje możliwość weryfikacji założeń projektowych oraz sprawdzenia, czy zaprojektowana sieć o określonych parametrach geometrycznych będzie w stanie odprowadzić takie ilości wód deszczowych, na jakie jest przewidziana, natomiast na etapie eksploatacji możliwe jest sprawdzanie rzeczywistych przepływów występujących w kanalizacji, sprawdzenie, jak zachowa się sieć po podłączeniu np. nowego osiedla, czy nie wystąpią lokalne podtopienia i wylania wód z kanalizacji.

Obecna praca stanowi przegląd tradycyjnych i nowoczesnych metod projektowania systemów kanalizacyjnych. Jednocześnie w IBS PAN są prowadzone prace związane z opracowaniem własnej aplikacji do modelowania, optymalizacji i projektowania miejskich sieci kanalizacyjnych, w oparciu o przedstawione procedury projektowania i przykłady już istniejących rozwiązań programowych. W szczególności aplikacja ta

ma być ukierunkowana na zastosowania do generowania planów inwestycyjnych dotyczących rewitalizacji sieci kanalizacyjnych. Jej podstawowe elementy, to model matematyczny sieci bazujący na przedstawionym modelu SWMM5 oraz algorytmy optymalizacji wielokryterialnej, generujące wariantowe scenariusze planów rewitalizacji.

Literatura

1. Błaszczyk W., Roman M., Stamatello H., „Kanalizacja, Arkady”, Warszawa 1974.
2. Heidrich Z., „Wodociągi i kanalizacja, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne”, Warszawa 1999.
3. Kotowski A., Kaźmierczak B., Dancewicz A., „Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji”, IPTT, Warszawa 2010.
4. Kotowski A., „O konieczności ujednoczenia zasad tworzenia modeli opadów miarodajnych do wymiarowania kanalizacji w Polsce”, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 7-8, 2011.
5. Leśniewski M., „Modelowanie sieci kanalizacyjnych za pomocą programu SWMM”, Konferencja: GIS, Modelowanie i Monitoring, PZiITS, Warszawa 2005.
6. Licznar P., „Nowoczesne projektowanie kanalizacji sanitarnej na bazie numerycznego modelu terenu w programie InRoads Storm&sanitarny”, Instal, nr 3, 2006.
7. Licznar P., „Nowoczesne projektowanie sieci odwodnienia na bazie numerycznego modelu terenu w programie InRoads Storm&Sanitarny”, Instal, nr 6, 2006.
8. Licznar P., „Komputerowe wspomaganie projektowania wiejskich sieci kanalizacyjnych”, Przegląd Komunalny, nr 11, 2007.
9. Licznar P., „Praktyczna realizacja modelu hydrodynamicznego sieci kanalizacyjnej w pakiecie SewerPac”, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 3, 2008.
10. PN-EN 752-1:2000, „Zewnętrzne systemy kanalizacyjne. Pojęcia ogólne i definicje”.
11. PN-EN 752-2:2000, „Zewnętrzne systemy kanalizacyjne. Wymagania”.
12. PN-EN 752-3:2000, „Zewnętrzne systemy kanalizacyjne. Planowanie”.
13. PN-EN 752-4:2001, „Zewnętrzne systemy kanalizacyjne. Obliczenia hydrauliczne i oddziaływanie na środowisko”.
14. Skotnicki M.: Komputerowe modele sieci kanalizacyjnych – program SWMM 5.0, Przegląd Komunalny, nr 5, 2005.
15. Skotnicki M.: Przegląd programów do obliczeń sieci kanalizacyjnych, Wodociągi i Kanalizacja, nr 7-8, 2005.
16. Badowski M., Makuch A.: Program KANKAN Wersja 4.53 Grawitacyjne sieci kanalizacyjne, Dokumentacja [Online]. <http://mbad.pl/kankan/>.
17. Rossmann L., „Storm Water Management Model – User’s manual, Wersja 5.0”, Dokumentacja [Online]. http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/wq/models/swmm/e_paswmm5_user_manual.pdf.